

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Лапоша Микола Юрійович



УДК 621.315.62

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ  
ВИПРОБУВАНЬ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ НА ДОПУСТИМИЙ  
РІВЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД**

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бржезицький Володимир Олександрович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
м. Київ, професор кафедри теоретичної електротехніки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Бойко Микола Іванович**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», м. Харків,  
професор кафедри інженерної електрофізики;

кандидат технічних наук  
**Таран Григорій Віталійович**  
Національний науковий центр «Харківський фізико-  
технічний інститут» НАН України, м. Харків,  
старший науковий співробітник відділу  
низькотемпературної нерівноважної плазмохімії

Захист дисертації відбудеться 21 вересня 2020 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «25» червня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. О. Шостак

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасному світі передача електроенергії від місць її виробництва до споживачів відбувається, в значній частині, по повітряних лініях електропередач, що потребує надійного функціонування їх основних елементів, у тому числі високовольтних ізоляторів. Щоб ізолятори зберігали свої характеристики протягом багатьох років, повинні бути детально відпрацьовані технологічні процеси їх виготовлення, проведений ряд електричних, механічних, а також спільних – електромеханічних випробувань. Багаторічна практика проведення випробувань ізоляторів показала, що найбільш чутливою ланкою в оцінці якості ізоляторів є їх рівні електромагнітних завад.

Електромагнітні завади від ізоляторів пов'язані з явищами, що відбуваються на їх поверхні, а саме з частковими розрядами, викликаними збільшенням локальних градієнтів потенціалу, коронними розрядами, обумовленими неоднорідностями у вигляді нальотів сухих речовин або крапель води або іскрінням на сухих ділянках, спричиненим струмами витоку на забруднених ізоляторах. Електромагнітні завади можуть бути також викликані іскрінням у внутрішніх раковинах або тріщинах ізоляції, зокрема в результаті розрядів у мікровключеннях повітря цементно-піщаного закладення. Це в свою чергу впливає на екологію навколишнього середовища, і, що особливо важливо в останній час, – на якість інтернет зв'язку, радіо- і телеєфіру. З урахуванням вище зазначеного зростають вимоги міжнародних стандартів до необхідного зниження рівня електромагнітних завад як від ізоляторів, так і від інших працюючих електротехнічних пристроїв. Слід відмітити, що випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад може бути також розповсюджено на інші види електроустаткування як чутливий та доступний метод контролю стану ізоляції.

В якості елементів існуючих установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень високочастотних електромагнітних завад використовують великогабаритні конструкції реакторів (котушок індуктивності) та конденсаторів, які мають, як правило, інше призначення для роботи при частоті 50 Гц, що не дозволяє виконувати обов'язкове екранування активних частин випробувальних установок від зовнішніх електромагнітних завад. Згадані елементи установок у більшості випадків розраховані як низькочастотні, проте при роботі на високих частотах, виникає непередбачувана взаємодія їх ємнісних та індуктивних складових струмів, що призводить до нестабільності результатів випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад і, як наслідок, до зниження ефективності відповідного випробувального електрообладнання, його невиправданого здорожчання та надмірного впливу зовнішніх електромагнітних завад.

Суттєві наукові результати щодо дослідження питань високовольтного випробувального електрообладнання, а також безпосередньо випробувань високовольтних ізоляторів, присвячена значна кількість робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів, серед яких слід відзначити таких вчених як Журавльов Е. М., Щерба А. А., Подольцев О. Д., Шумілов Ю. М., Кім Є. Д., Мікуцький Г. В.,

Биховський Я. Л., Рижавський Г. Я, Цимберов А. Й., Злаказов А. Б., Кулик Н. М., Allan R. N., Kuffel E., Reddy B. S, Kumar U.

Однак аналіз їх праць та існуючих публікацій показав, що для забезпечення високої ефективності електрообладнання (відповідних установок) для проведення випробувань на допустимий рівень електромагнітних завад виникає необхідність в додатковій розробці математичної моделі реактора високочастотного загороджувача, розвитку методів регулювання електричного поля на основі теорії кіл з розподіленими параметрами, розрахунку та узгодження розподілення електричних та магнітних полів у високочастотній котушці індуктивності з розширеним використанням сучасної обчислювальної техніки.

В цілому можна зробити висновок, що підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів є актуальним та важливим науковим завданням, вирішенню якого присвячена дана робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в ході проведення на кафедрі теоретичної електротехніки факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» науково-дослідних робіт: «Розробка, виготовлення та поставка експериментального зразка установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад» (№ державної реєстрації 0115U005172) та «Дослідження характеристик високовольтних лінійних скляних ізоляторів» (№ державної реєстрації 0116U005679), в яких здобувач був головним виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів.

Для досягнення мети поставлені наступні основні задачі:

1. Аналіз стану досліджень і розробок в області випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.
2. Розробка математичної моделі реактора високочастотного загороджувача на основі теорії кіл з розподіленими параметрами.
3. Розвиток методу регулювання електричного поля в високочастотній котушці індуктивності за допомогою формування її ізоляційного остову.
4. Визначення граничних значень напруги виникнення часткових розрядів у високовольтному лінійному тарілчастому ізоляторі.
5. Удосконалення високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора для зниження його рівня електромагнітних завад.

6. Розробка, виготовлення та підготовка до проведення калібрування промислової установки для випробувань високовольтних ізоляторів, що виробляються в Україні, на допустимий рівень електромагнітних завад.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні процеси в електрообладнанні для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.

*Предмет дослідження* – методи та засоби підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.

**Методи дослідження** базуються на використанні:

- теорії електромагнітного поля та дії його електричних та магнітних складових (розрахунок електричної та магнітної складових електромагнітного поля в високочастотних загороджувачах дозволяє визначати їх вплив на розподілення індукованого та електричного потенціалів в них);

- теорії високовольтних електричних апаратів (визначення конструктивних та функціональних особливостей використовуваних високовольтних пристроїв дозволяє узгоджувати їх характеристики з розподіленням електромагнітного поля в елементах конструкції);

- теорії електроізоляційних матеріалів (визначення граничних меж застосування електротехнічних матеріалів та змін їх властивостей в цих межах дозволяє впливати на характеристики високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів);

- теорії електричних вимірювань та високовольтних випробувань (визначення параметрів електричних та магнітних кіл високочастотних загороджувачів за різних режимів роботи дозволяє в подальшому виконувати прогнозування їх характеристик);

- методів математичного моделювання та розрахунку електричних і магнітних полів за допомогою відповідних програм з використанням ПК (моделювання процесів в високочастотних загороджувачах та чисельні розрахунки за допомогою ПК дозволяють одержувати розрахункові параметри загороджувачів для їх порівняння з експериментальними даними);

- методів математичної статистики (обробка експериментальних даних за допомогою програмних засобів дозволяє оцінювати достовірність отриманих результатів);

- методів обробки результатів натурних та модельних експериментів (обробка результатів експериментів та моделювання дозволяє виконувати їх співставлення за визначеними критеріями);

- методів виконання метрологічних робіт з високовольтними засобами вимірювальної техніки (визначення метрологічних характеристик розробленого високовольтного електрообладнання експериментальним шляхом дозволяє контролювати запропоновані в роботі теоретичні положення).

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблено математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність,

що дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача на задану високу частоту та суттєво збільшити його прохідний опір.

2. Розвинуто метод регулювання електричного поля в котушці індуктивності височастотного загороджувача шляхом формування її ізоляційного остову, що дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу, а також послабити негативний вплив зовнішніх електромагнітних полів.

3. Знайшло подальший розвиток визначення залежності граничних значень напруг виникнення часткових розрядів від розмірів повітряних мікровключень у цементно-піщаному закладенні високовольтного ізолятора, які обумовлені електричним пробоем цих мікровключень, що дозволяє прогнозувати порогові значення напруги появи електромагнітних завад ізоляторів.

4. Вперше запропоновані взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини сталевго стрижня ізолятора, які виходять із забезпечення незмінності напружень стискання та зрізу в його цементно-піщаному закладенні, що дозволяє досягти зниження локальних значень напруженості електричного поля та рівня електромагнітних завад ізолятора.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

Запропоновано виконання ізоляційного остову котушки індуктивності височастотного загороджувача на основі оптимізації електричного поля в її конструкції за плануванням багатофакторного експерименту, використання якого дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача, збільшити його прохідний опір з 20 кОм до 100 кОм та зменшити його габаритні розміри (за висотою) в 3,5 рази, що забезпечує відповідне зниження матеріальних витрат та дає змогу застосування екранування установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (пріоритет підтверджено патентом України «Височастотний загороджувач» № 115475 від 10.11.2017 р.).

Обґрунтовано удосконалення високовольтного скляного тарілчастого ізолятора, яке полягає у профілюванні його конічної частини стрижня та врахуванні співвідношень розмірів елементів ізолятора, що дозволяє знизити локальні значення напруженості електричного поля в ізоляторі в 2,14 рази.

Розроблене та експериментально перевірене в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б удосконалене виконання високовольтного скляного тарілчастого ізолятора підтверджує можливість створення нових високовольтних лінійних ізоляторів зі зменшенням на 16...29 дБ рівнем електромагнітних завад.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» в установці для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, яка була розроблена, виготовлена в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» разом з Науковим парком «Київська політехніка» за безпосередньої участі здобувача. Державним підприємством «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») проведено калібрування виготовленої установки, за

результатами якого видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. Результати дисертаційної роботи також впроваджені в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і теоретичні результати, викладені в дисертаційній роботі, одержано автором особисто.

В наукових працях, які опубліковані в співавторстві, здобувачу належить фактичний матеріал і основний творчий доробок, а саме: в [1, 10, 11] – проведено дослідження розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці; в [3, 8] – проведено регулювання розподілення напруженості електричного поля в ізоляційній конструкції котушки шляхом формування ізоляційного остову; в [5, 9] – обґрунтовано та досліджено математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача; в [6, 12] – проведено дослідження максимальної напруженості електричного поля та порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні удосконаленої конструкції ізолятора; в [2] – визначено основні параметри та характеристики розробленої установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад; в [4] – планування та проведення експериментальних досліджень високовольтних ізоляторів, а також обробка їх результатів; в [7] – проведено дослідження впливу профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

- Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», (Україна, м. Київ, 2014, 2015, 2016 рр.);

- XIX Міжнародному симпозіумі SIEMA'2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Україна, м. Харків, 2016 р.);

- XXII Міжнародному семінарі «Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED–2017)» (Україна, м. Дніпро, 2017 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 7 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на винахід, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, складається із анотацій на 12 сторінках, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг основної частини дисертації складає 105 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 45 рисунками та 20 таблицями. Список використаних джерел містить 117 найменувань та викладений на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, встановлені методи досліджень, висвітлені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію і наукові публікації.

У першому розділі проведений огляд літературних джерел, пов'язаних з науковим завданням дослідження. Проаналізовано особливості використання підвісних високовольтних ізоляторів, зазначено загальні вимоги до конструктивного виконання та характеристик підвісних тарілчастих ізоляторів.

Визначено можливі причини виникнення електромагнітних завад від ізоляторів та їх вплив на екологію навколишнього середовища, зокрема, на якість інтернет зв'язку, радіо- і телебачення. Розглянуто допустимі рівні електромагнітних завад при нормованих напругах ізоляторів, а також норми рівня електромагнітних завад ліній електропередач різних країн.

Проведений аналіз вимог регламентуючого міжнародного нормативного документа CISPR 18-2 щодо методів випробування та процедури встановлення норм електромагнітних завад високовольтних ізоляторів, за яким визначено умови випробувань та граничні нормовані значення зовнішніх електромагнітних завад як ізоляторів, так і випробувальних установок.

Описано схеми існуючих установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад та охарактеризовані особливості виконання основних елементів установок. Встановлено, що елементи цих установок являють собою громіздкі конструкції, які розраховані на роботу при низьких частотах. При роботі таких схем на високих частотах відбувається непередбачувана взаємодія їх ємнісних та індуктивних складових струмів, що призводить до нестабільності результатів випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад і, як наслідок, до зниження ефективності відповідного випробувального електрообладнання, його невикористання, здорожчання та надмірного впливу зовнішніх електромагнітних завад. Крім того, значні розміри цих елементів унеможливають обов'язкове екранування активних частин установок від зовнішніх електромагнітних завад.

З метою виготовлення малогабаритних високовольтних високочастотних загороджувачів, які є одними з основних елементів установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, було розглянуто питання досвіду використання високочастотних загороджувачів на лініях електропередач, та з'ясовано неможливість їх використання у відповідних установках.

Проведений аналіз літературних джерел підтверджує доцільність проведення наукових досліджень, направлених на вирішення актуального наукового завдання з підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального



електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів.

У другому розділі розроблено математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача, яка враховує вплив індуктивності та взаємодій його окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність.

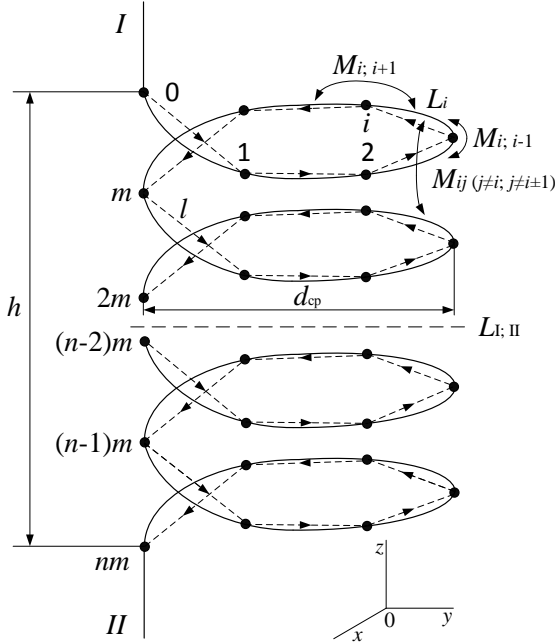


Рисунок 1 – Структурна модель реактора високочастотного загороджувача

Структурна модель реактора, яка враховує електрофізичні взаємодії в реакторі  $L_{I,II}$  високочастотного загороджувача, представлена на рис. 1, де  $I, II$  – підводи реактора;  $n$  – кількість витків реактора;  $m$  – відображає розбиття одного витка реактора на ціле число провідників (для досягнення прийнятної похибки  $\sim 1\%$ ,  $m \geq 12$ ), причому ці частини замінюються прямолінійними елементарними провідниками (хордами)  $0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 2; \dots i-1 \rightarrow i; i \rightarrow i+1; \dots nm-1 \rightarrow nm$ . В цьому випадку довжина кожного елементарного прямолінійного провідника є однаковою –  $l$ ; стрілка  $\rightarrow$  показує вибраний позитивний напрямок протікання струму; номерами  $0; 1; 2; \dots i; \dots nm$  позначені вузли, які знаходяться на середній лінії проводу гвинтової (як правило) намотки реактора по діаметру  $d_{ср}$ .

Для аналізу процесів та визначення параметрів реактора високочастотного загороджувача в роботі запропоновано схему заміщення з використанням типових П-елементів, яка представлена на рис. 2.

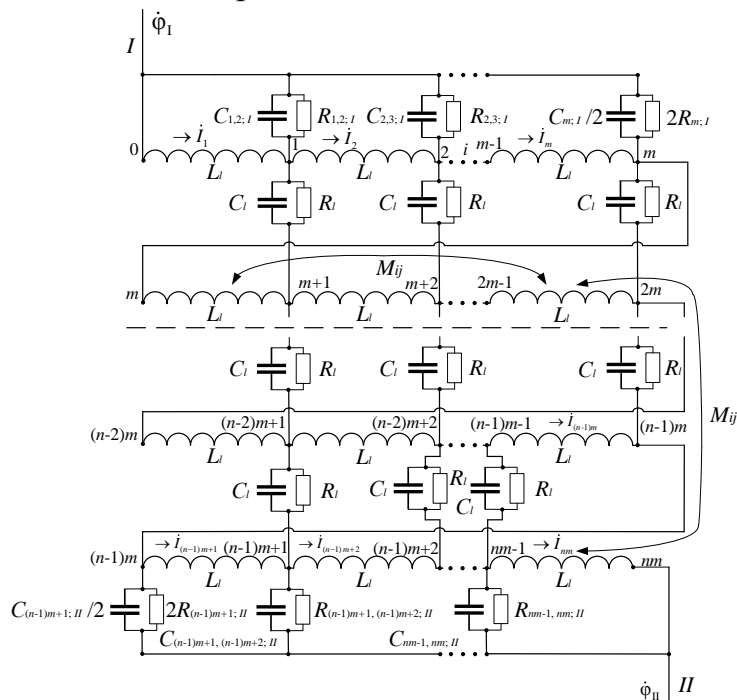


Рисунок 2 – Схема заміщення реактора з використанням типових П-елементів

Складено систему рівнянь реактора при заданій різниці потенціалів струмопроводів  $\dot{\phi}_I, \dot{\phi}_{II}$ . Шуканими є різниці потенціалів вузлових точок  $\dot{\phi}_1; \dot{\phi}_2 \dots \dot{\phi}_{nm-1}$ , а також струми  $\dot{I}_1; \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{nm}$ . Всього маємо замкнену систему рівнянь з  $nm-1$  невідомими різницями потенціалів та з  $nm$  невідомими струмами.

Для умови, коли сума ємнісних струмів в кожній із точок  $i = 1; 2 \dots nm-1$  дорівнює нулю,  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dots = \dot{I}_{nm} = \dot{I}$ , з системи рівнянь реактора слідує:

$$\dot{\phi}_I - \dot{\phi}_{II} = j\omega \dot{I} (nmL_l + \sum_{i=1}^{nm} \sum_{j=1}^{nm} M_{ij(j \neq i)}), \quad (1)$$

де  $L_l$  – індуктивність елементарного провідника та  $M_{ij}$  – взаємна індуктивність провідників реактора, та далі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi}_I - \dot{\phi}_1 = (\dot{\phi}_I - \dot{\phi}_{II}) \frac{L_l + \sum_{i=2}^{nm} M_{li}}{nmL_l + \sum_{i=1}^{nm} \sum_{j=1}^{nm} M_{ij(j \neq i)}}, \dots \dot{\phi}_{nm-1} - \dot{\phi}_{II} = (\dot{\phi}_I - \dot{\phi}_{II}) \frac{L_l + \sum_{i=1}^{nm-1} M_{nmi}}{nmL_l + \sum_{i=1}^{nm} \sum_{j=1}^{nm} M_{ij(j \neq i)}} \end{array} \right. \quad (2)$$

Розподілення різниць потенціалів відносно  $\dot{\phi}_I - \dot{\phi}_{II}$  буде незмінним і незалежним від частоти  $\omega$  (за умови зберігання вихідних допущень задачі). Тоді з урахуванням  $\text{tg} \delta_{ij} = \text{const}$  (або  $\text{tg} \delta_{ij} \ll 1$ ) вибором форми екранів струмопроводів  $I, II$ , значень часткових ємностей  $C_{ij}$  можна дійсно забезпечити компенсацію ємнісних струмів в кожній із вузлових точок  $i = 1; 2; \dots nm-1$ . В цьому випадку схема заміщення реактора перетворюється до виду, представленого на рис. 3.

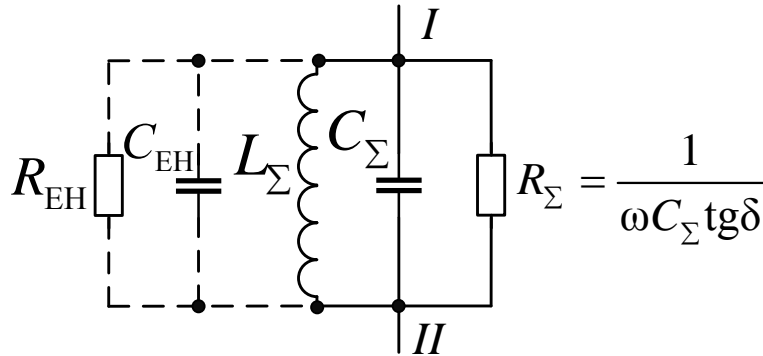


Рисунок 3 – Еквівалентна схема заміщення високочастотного реактора в узгодженому режимі, де  $L_\Sigma$  – «сумарна» індуктивність реактора,  $C_\Sigma$  – «власна» ємність реактора (штриховими лініями показані додаткові параметри елементів налаштування  $R_{EH}, C_{EH}$  при використанні реактора в схемі ВЧЗ)

Такий режим реактора, в якому індуктивні та ємнісні складові струмів в широкому діапазоні частот не будуть залежати один від одного, можна назвати компенсуючим. При цьому еквівалентна схема заміщення реактора за рис. 3 залишається незмінною, а параметри реактора – стабільними та прогнозованими в області робочих частот до  $\sim 5$  МГц.

У підсумку, вперше запропоновано математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що заснована на використанні теорії кіл з розподіленими параметрами та можливостей сучасної обчислювальної техніки, яка,

на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємодуктивності його окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність.

При розробці установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад значну увагу приділяють одному з основних складових елементів – високочастотному загороджувачу, який виконує функцію запобігання проникненню ззовні струмів електромагнітних завад в високовольтні з'єднувальні кола і, отже, послаблення струмів електромагнітних завад від впливу завадоутворюючих джерел у високовольтній частині установки.

Для реальної конструкції ВЧЗ розроблюваної установки на частоти 0,5 МГц та 1,0 МГц було прийнято рішення виготовити реактор у вигляді найпростішого виконання – соленоїдальної котушки з мінімальною кількістю витків, але при цьому компенсація ємнісних струмів забезпечувалась узгодженням розподілення електричного потенціалу в котушці з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу за рахунок виконання профілювання внутрішньої поверхні її ізоляційного остову, пошук якого здійснювався за допомогою послідовного симплекс методу розв'язання задач оптимізації

В результаті проведення 15 серій оптимізаційних розрахунків було одержано форму внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки (рис. 4), при якій забезпечується узгодження розподілення індукованого та електричного потенціалів котушки до  $\leq 1\%$ .

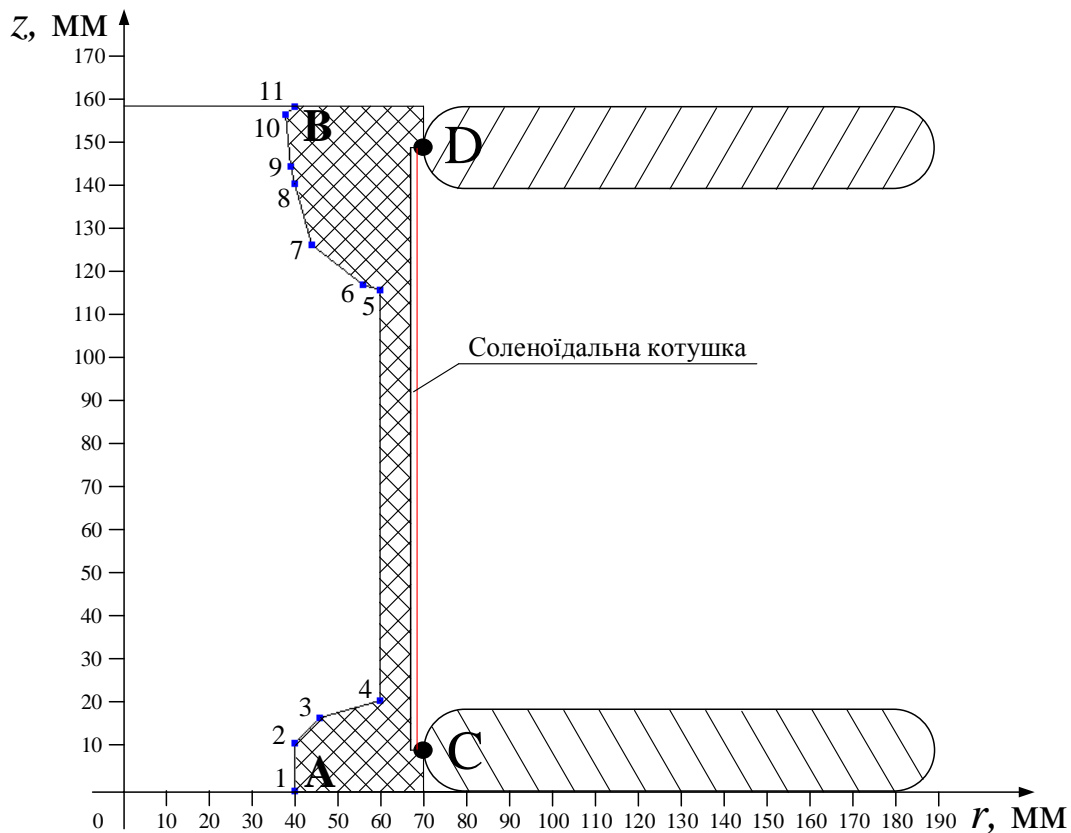


Рисунок 4 – Оптимізована форма внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки ВЧЗ (при значенні відносної діелектричної проникності матеріалу остову 3,15), де C, D – металеві кільцеві електроди

Проведені розрахунки дозволили оцінити ефективність регулювання поля зміною товщини діелектрика в різних перерізах остову котушки. При цьому виявляється, що найбільш сильно «регулюючий ефект» проявляється при зміні товщини остову в верхній частині котушки, яка характеризується підвищеною напруженістю поля.

Розроблене оптимізоване виконання малогабаритного високочастотного загороджувача характеризується стабільністю розподілення електромагнітного поля в елементах та передбачає його використання в установці для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. До того ж, заміна елементів настроювання, які звичайно реалізуються з використанням серійних конденсаторів, що характеризуються нестабільністю параметрів при частотах  $\sim 1$  МГц, ємністю в повітрі між двома металевими кільцевими електродами С, D утворює додатковий фактор забезпечення стабільності параметрів малогабаритного ВЧЗ установки для випробувань ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. Крім того, фактично, унеможливується проникнення ззовні електромагнітних завад в котушку ВЧЗ, що додатково підвищує стабільність його параметрів.

У третьому розділі описуються експериментальні дослідження та впровадження, виконані за теоретичними положеннями, розробленими в розділах дисертаційної роботи.

Вперше для Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» (ТзОВ «ЛІК») на основі матеріалів даної дисертаційної роботи розроблено та виготовлено установку для випробування ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у повній відповідності до вимог міжнародних стандартів CISPR 18-2, IEC 60437, яка дозволяє проводити нормовані випробування виготовлених в Україні високовольтних ізоляторів зі зниженим рівнем електромагнітних завад в робочому діапазоні випробувальної напруги від 10 кВ до 40 кВ на базисних частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц.

Схема розробленої установки наведена на рис. 5, де РН – регулятор напруги; ТР – високовольтний трансформатор; НВО, ВВО, ВО – низьковольтна, високовольтна та вимірювальна обмотки ТР; F – високовольтний запобіжник; pV – вольтметр вимірювальної обмотки; L<sub>в</sub> – котушка ВЧЗ; E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> – металеві кільцеві електроди ВЧЗ; S – монтажний стрижень; І – ізолятор, що випробовується; С – високовольтний конденсатор зв'язку; FV – низьковольтний розрядник; ХТ1 – з'єднувальний провід; Р<sub>1</sub> – вхідний роз'єм низьковольтного блока установки; Е – внутрішній екран низьковольтного блока установки; L<sub>1</sub> – компенсуюча котушка; L<sub>2</sub> – котушка подільника напруги; SA1-SA5 – перемикачі; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – подільник напруги; Р<sub>2</sub> – вихідний роз'єм низьковольтного блока установки; Р<sub>3</sub> – допоміжний роз'єм; ХТ2 – з'єднувальний коаксіальний кабель; SMV-11 – селективний мікровольтметр (9 кГц – 30 МГц), який відповідає вимогам встановленим у Публікації CISPR 16-1-1; R<sub>m</sub> – вхідний опір SMV-11.

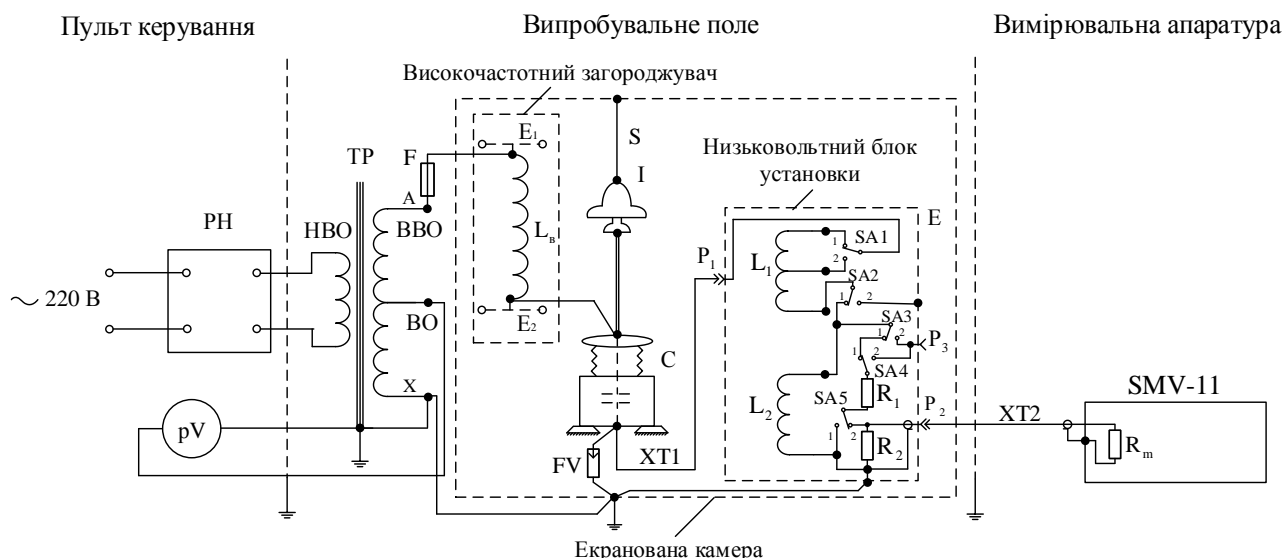


Рисунок 5 – Схема розробленої установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад

Зовнішній вигляд установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад представлений на рис. 6.

Для живлення установки було обрано високовольтний трансформатор типу РЕОІ 100/200 А з низьковольтною, високовольтною та вимірювальною обмотками, коефіцієнт трансформації за напругою якого становить  $0,4 \text{ кВ}/1 \text{ В} = 400$ . Форма вихідної напруги даного високовольтного трансформатора задовольняє вимогам Публікації ІЕС 60060-2. Струмopрiвiд, який під'єднаний до високовольтної обмотки трансформатора, проходить крізь отвір екранованої камери установки та приєднується до електроду  $E_1$  ВЧЗ.

Стабільність ємності ВЧЗ забезпечується використанням металевих кільцевих електродів  $E_1$ ,  $E_2$  та вираховується за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics і становить  $C_E = 11,17 \text{ пФ}$ . В якості ізоляції конденсатора  $E_1$ ,  $E_2$  використовується повітря, що забезпечує частотну стабільність параметрів конденсатора та відсутність в ньому нелінійних явищ (за умови недопущення корони).



Рисунок 6 – Зовнішній вигляд установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (фото), де 1 – досліджуваний високовольтний ізолятор; 2 – ВЧЗ; 3 – конденсатор зв'язки; 4 – низьковольтний блок установки; 5 – екранована камера; 6 – високовольтний струмопровiд

Для режиму установки 0,5 МГц розрахункова індуктивність котушки ВЧЗ складає  $L_{\text{в}} = 9,07$  мГн, а для режиму установки 1,0 МГц –  $L_{\text{в}} = 2,26$  мГн.

До виходу котушки ВЧЗ (електроду  $E_2$ ) приєднано високовольтний струмопровід, яким забезпечується подання напруги на вхід високовольтного конденсатора зв'язку, та з нього на об'єкт випробування – ізолятор.

Розроблена установка калібрована Державним підприємством «Укрметртестстандарт», за результатами якої видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. та підтверджено мінімальні значення рівня зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), що дозволяє проводити випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ з запасом по відношенню до нормованого значення фону установки на 21 дБ при 18 кВ (20 кВ) та на 52 дБ при 30 кВ (40 кВ), що суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених за міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

З урахуванням вище зазначеного, при появі більш жорстких вимог до допустимого рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів (або іншого електроустаткування), розроблена установка дозволяє проводити випробування та підвищувати їх характеристики (на перспективу).

Введення розробленої установки в експлуатацію та її атестація дозволяє проводити систематичні дослідження рівня електромагнітних завад ізоляторів, вибирати режими технологічних параметрів виготовлення, при яких рівень електромагнітних завад ізоляторів буде відповідати заданим характеристикам.

Проведені дослідження з використанням установки показали, що варіювання поверхні ЦПЗ ізоляторів та характеристик його покриття не забезпечують додаткового зниження їх рівня електромагнітних завад, яке необхідне за вимогами деяких країн.

**В четвертому розділі** розглянуті питання дослідження розподілення електричного поля у високовольтному ізоляторі на основі рішення вісе-симетричної задачі розрахунку напруженості електричного поля методом скінченних елементів.

Для дослідження розподілення електричного поля було використано, як приклад, типовий скляний тарілчастий ізолятор ПС 120Б. Вибір даного типу ізолятора пов'язаний із широким використанням його в електричних мережах змінного струму.

Аналіз розподілення електричного поля в конструкції високовольтного ізолятора проводили за допомогою вирішення задачі методом скінченних елементів в програмному пакеті Comsol Multiphysics.

На рис. 7 показано розподілення напруженості електричного поля в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора.

Встановлено, що найбільш напруженою в ізоляторі є область заокруглення конічної частини стрижня, де максимально проявляється дія електричного поля. Розрахункова напруженість в області заокруглення радіусом  $R = 0,5$  мм конічної частини стрижня ізолятора становить  $E = 42,3$  кВ/см (амплітудне значення) при напрузі на ізоляторі  $U = 10\sqrt{2}$  кВ.

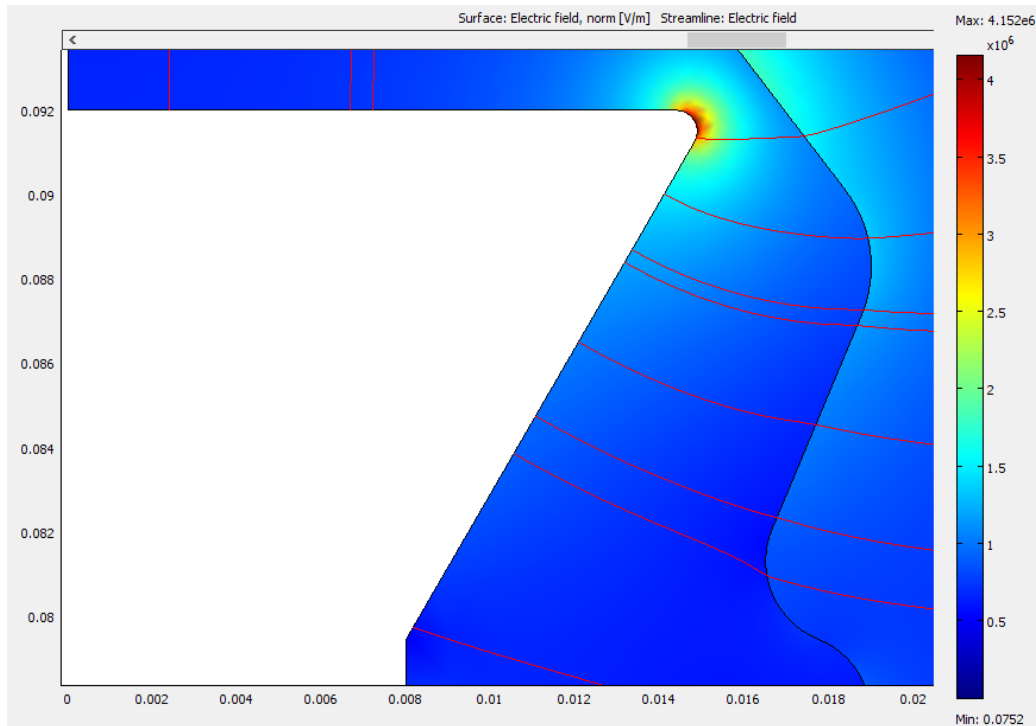


Рисунок 7 – Картина розподілення напруженості електричного поля в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора

При проведенні структурних експериментальних досліджень зразків зрізів ЦПЗ високовольтних лінійних ізоляторів типу ПС 120Б виявлено, що вони містять сфероподібні повітряні мікровключення з діаметрами  $d_v$  від 0,05 мм до 0,25 мм. Розглянуто умови виникнення ЧР в сферичному мікровключенні, заповненому газом з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_v \approx 1$ , яке знаходиться в товщі діелектрика з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_d$ . Під дією зовнішнього електричного поля на межі сферичного мікровключення з'являються некомпенсовані заряди, які призводять до посилення електричного поля всередині мікровключення. Розраховано напруженості електричного поля, при яких відбувається пробій мікровключень, та, відповідно, – граничні напруги на ізоляторі  $U_{гр}$ , які відповідають електричному пробію цих включень.

Одним із шляхів зниження напруженості електричного поля в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора, та відповідно значень  $U_{гр}$ , є виконання стрижня ізолятора з таким профілюванням його конічної частини, що потребує забезпечення незмінності виникаючих механічних напружень в цементно-піщаному закладенні (як до, так і в результаті профілювання), а також врахування основних співвідношень розмірів елементів ізолятора.

Розрахункова модель стрижня ізолятора при профілюванні його конічної частини представлена на рис. 8. Інші елементи ізолятора приймалися незмінними.

Визначення напружень стискання  $\sigma_{ст}$  ЦПЗ проводилось за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{1,1P \sin \alpha}{S_k}, \quad (3)$$

де  $P$  – максимальне механічне нормоване навантаження, кН;  $S_k$  – площа поверхні конічної частини стрижня,  $m^2$  та  $\alpha$  – кут за рис. 8; 1,1 – нормований коефіцієнт «запасу».



При врахуванні напружень зрізу  $\sigma_{зр}$  їх значення визначались за формулою:

$$\sigma_{зр} = \frac{1,1P}{\pi d_{\max} \cdot h_{цпз}}, \quad (4)$$

де  $d_{\max}$  – максимальний діаметр конічної частини стрижня ізолятора,  $h_{цпз}$  показано на рис. 8.

На рис. 9 наведені розрахункові граничні значення напруги на ізоляторі  $U_{гр}$ , при яких виникає пробій сферичних мікровключень.

Виходячи з даних рис. 9, профілювання конічної частини стрижня ізолятора, яке полягає в одночасному забезпеченні еквівалентності моделей за умовою незмінності механічних напружень стискання та зрізу в ЦПЗ, забезпечить зниження максимальної напруженості електричного поля та підвищення порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні в 2,14 рази.

Це надає можливість створення перспективних конструкцій високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів зі зменшеним рівнем електромагнітних завад.



Рисунок 8 – Розрахункова модель ЦПЗ та стрижня ізолятора при профілюванні його конічної частини

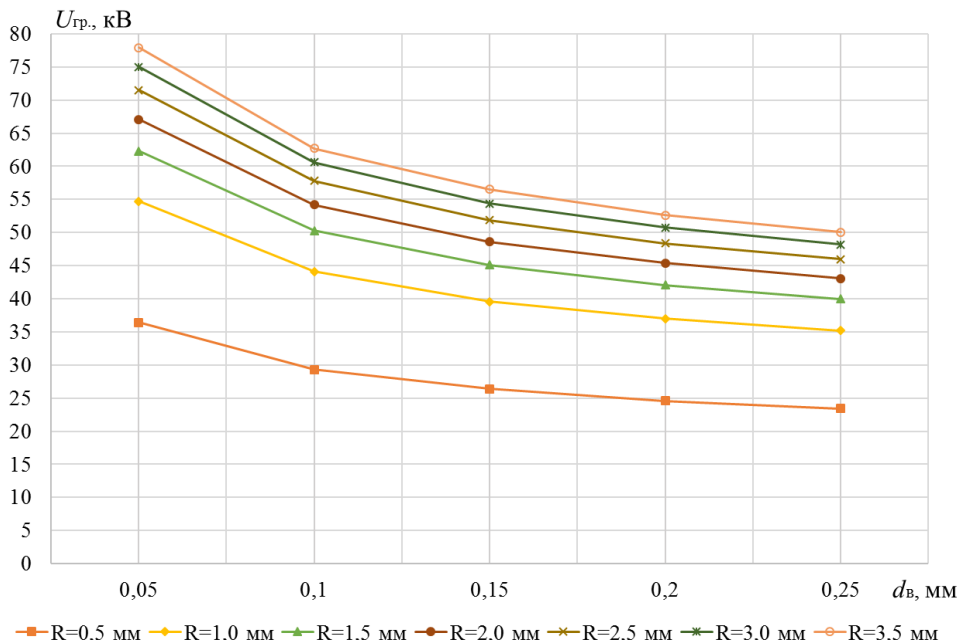


Рисунок 9 – Графік залежності граничних значень напруги  $U_{гр}$ , при яких відбувається пробій мікровключень, від їх діаметру  $d_в$  для різних моделей профілювання конічної частини стрижня ізолятора з радіусом заокруглення  $R$

Для дослідження впливу зменшення напруженості електричного поля в області конічної частини стрижня ізолятора на рівень електромагнітних завад ТЗОВ «ЛІК» було виготовлено експериментальні зразки високовольтних ізоляторів



за типом ПС 120Б з радіусом заокруглення конічної частини стрижня  $R = 3,5$  мм в кількості 10 шт. Дані зразки були заармовані згідно прийнятої в ТзОВ «ЛІК» технологією.

За допомогою створеної установки для випробувань ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад були проведені випробування вищезазначених експериментальних зразків високовольтних ізоляторів з радіусом заокруглення конічної частини стрижня  $R = 3,5$  мм, а також контрольних зразків (в кількості 10 шт.) високовольтних ізоляторів типу ПС 120Б, виготовлених за традиційною технологією.

Встановлено, що усереднений рівень електромагнітних завад експериментальних зразків високовольтних ізоляторів в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б був зменшений на 16...29 дБ при випробувальних напругах 10...30 кВ.

Отже, експериментально показано, що на рівень електромагнітних завад підвісних тарілчастих скляних ізоляторів впливає область конічної частини стрижня, а запропоновані рекомендації щодо її профілювання дозволяють суттєво знизити рівень електромагнітних завад ізоляторів.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів. Отримані наукові результати мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних та магнітних полів, а також практики випробувань електроустаткування на допустимий рівень електромагнітних завад.

1. Аналіз стану досліджень і розробок в області випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад показав, що еволюційний розвиток відповідних випробувальних установок протягом тривалого часу базується на використанні теорії кіл з зосередженими параметрами, аперіодичних L, R та C, R частотних фільтрів, яке вимагає застосування неспеціалізованих великогабаритних L, C – елементів, запозичених із низькочастотних схем, що не дозволяє виконувати екранування активних частин випробувальних установок від зовнішніх електромагнітних завад.

2. Розроблено математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що заснована на використанні теорії кіл з розподіленими параметрами та можливостей сучасної обчислювальної техніки, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності окремих витків та частин провідників, а також їхньої ємності, що дозволяє поширити її застосування для частот, як до, так і вище 1 МГц.

3. На основі розробленої математичної моделі реактора та її застосуванні до умов високочастотних загороджувачів випробувальних установок на електромагнітні завади сформульовані теоретичні положення режиму

компенсуючого реактора, які на відміну від існуючих виконань загороджувачів, орієнтованих на використання частотного діапазону до 1 МГц та максимальних значень прохідного опору до 1 кОм, дозволяють забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувачів на задані високі частоти, а також збільшення їх прохідного опору до 20 кОм і вище.

4. Розвинуто метод регулювання електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача шляхом формування її ізоляційного остову, який дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу до співпадіння  $\leq 1\%$ , що надає можливість досягнення її стабільних характеристик в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, без впливу неконтрольованих ємнісних струмів витoku (пріоритет підтверджений патентом України «Високочастотний загороджувач» № 115475 від 10.11.2017 р.).

5. Визначено граничні значення напруги виникнення часткових розрядів (та пов'язаних з ними електромагнітних завад) у повітряних мікровключеннях цементно-піщаного закладення високовольтного ізолятора на основі розрахунку методом скінченних елементів локальних значень напруженості електричного поля та врахування електричного пробоя цих мікровключень, що дозволяє отримати залежності граничних значень напруг виникнення часткових розрядів від розмірів повітряних мікровключень у цементно-піщаному закладенні високовольтного ізолятора та прогнозувати відповідні порогові значення напруги появи електромагнітних завад ізолятора.

6. Запропоновано зниження рівня електромагнітних завад високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора, обумовлених пробоем повітряних мікровключень в цементно-піщаному закладенні, шляхом уведення взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини сталевго стрижня ізолятора, які виходять із забезпечення незмінності механічних напружень в його цементно-піщаному закладенні, що дозволяє досягти зниження локальних максимальних усереднених значень напруженості електричного поля в ньому в 2,14 рази. Обґрунтовано удосконалення високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора (на прикладі ізолятора ПС 120Б), яке полягає у профілюванні конічної частини стрижня при одночасному забезпеченні незмінності максимальних механічних напружень стискання та зрізу у цементно-піщаному закладенні, що забезпечить можливість створення перспективних типів високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів зі зменшеним рівнем електромагнітних завад.

7. Для Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» на основі матеріалів даної дисертаційної роботи Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» разом з Науковим парком «Київська політехніка» за безпосередньої участі здобувача розроблено та виготовлено установку для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у відповідності до вимог міжнародних стандартів CISPR 18-2, IEC 60437, яка дозволяє проводити нормовані випробування виготовлених високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад за умовами експорту високовольтних ізоляторів з України.

8. Державним підприємством «Укрметртестстандарт» проведено калібрування установки для випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, за результатами якого видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. та підтверджено мінімальні значення рівня зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), що дозволяє проводити випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ з запасом по відношенню до нормованого значення фону установки на 21 дБ при 18 кВ (20 кВ) та на 52 дБ при 30 кВ (40 кВ), що суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених за міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» в установці для випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, а також в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», що підтверджено актами впровадження.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 6/1 (26). С. 50–54. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus, РИНЦ)**. Здобувачем проведено дослідження розподілення індукованого магнітним полем соленоїдальної котушки потенціалу.

2. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розробка установки для випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 1/1(27). С. 37–41. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus, РИНЦ)**. Здобувачем обґрунтовано принципи відмінності розробленої установки для випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад та надано її опис.

3. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Проценко О. Р. Регулювання електричного поля високовольної котушки за допомогою профілювання діелектрика. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22, № 2. С. 173–180. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus)**. Здобувачем розвинуто метод регулювання електричного поля котушки індуктивності за допомогою профілювання поверхні її діелектричного остову з використанням послідовного симплекс-методу.

4. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Олександренко С. І. Випробування високовольних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22, № 3. С. 166–175. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus)**. Здобувачем проведено експериментальні дослідження рівня електромагнітних завад ізоляторів та статистичну обробку їх результатів.

5. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Компенсований високовольний високочастотний реактор. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 4. С.

112–119. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus)**. Здобувачем розроблено математичну модель компенсуючого високовольтного височастотного реактора та проведено розрахунки його характеристик на персональному комп'ютері.

6. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Хомініч В. І. Удосконалення високовольтних лінійних скляних ізоляторів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 6. С. 101–111. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus)**. Здобувачем проведено дослідження порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні удосконаленої конструкції ізолятора.

7. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Вплив профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 6. С. 85–92. **(Міжнародна індексація: Index Copernicus)**. Здобувачем проведено дослідження впливу профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні.

8. Височастотний загороджувач: пат. 115475 Україна, МПК H04B 3/56. № а201510741; заявл. 04.11.2015; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 4 с. Здобувачем запропоновано виконання ізоляційного остову котушки індуктивності височастотного загороджувача на основі оптимізації електричного поля в її конструкції за плануванням багатofакторного експерименту.

9. Brzhezytskyi V. O., Laposha M. Y., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V. Mathematical Model of the Compensating High Frequency Line Reactor. *Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED-2017)*: матеріали XXII-го Міжнародного Семінару, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара, Дніпро, Україна, 2017, С. 152–156. **(Міжнародна індексація: Scopus)**. Здобувачем обґрунтовано врахування в математичній моделі компенсуючого реактора височастотного загороджувача впливу індуктивності та взаємодуктивності його окремих витків та частин провідників, а також їхньої ємності.

10. Ващук С. В., Лапоша М. Ю. Розробка котушок індуктивності з рівномірним розподіленням індукованого потенціалу. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. Київ : «Політехніка», 2014. – С. 331–332. Здобувачем розроблено метод вибору геометрії котушок індуктивності для забезпечення рівномірного розподілення індукованого потенціалу.

11. Бабічева А. А., Лапоша М. Ю. Визначення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. Київ : «Політехніка», 2015. С. 395–397. Здобувачем сформульована математична задача розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці.

12. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Ярмоцик Є. С. Зниження рівня радіозавад високовольтних лінійних ізоляторів. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів.

Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. Київ : «Політехніка», 2016. С. 347–350. *Здобувачем проведено дослідження розподілення напруженості електричного поля високовольтного ізолятора при зміні конструкції його елементів.*

13. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Євдокимов О. І. Дослідження механічних напружень у високовольтному лінійному ізоляторі. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. Київ : «Політехніка», 2016. С. 351–353. *Здобувачем проведено дослідження розподілення механічних напружень у силовому вузлі високовольтного ізолятора при модернізації виконання його елементів.*

## АНОТАЦІЇ

**Лапоша М. Ю. Підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів.

Вперше розроблено математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача, що дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача на задану високу частоту та збільшити його прохідний опір до 20 кОм і вище.

Розвинуто метод регулювання розподілення електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача, що дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу, а також послабити негативний вплив зовнішніх електромагнітних полів.

Вперше запропоновані взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини стрижня ізолятора, що дозволяють досягти зниження локальних значень напруженості електричного поля та рівня електромагнітних завад ізолятора.

За обґрунтованими в дисертації теоретичними положеннями розроблено, виготовлено та калібровано установку для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, в основу дії якої покладено розроблену математичну модель реактора високочастотного загороджувача.

**Ключові слова:** *високовольтний ізолятор, високочастотна котушка індуктивності, високочастотний загороджувач, електричне поле, електричний потенціал, індукований потенціал, рівень електромагнітних завад, симплекс-метод.*

**Laposha M. Electrical equipment efficiency increase for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference.** – Manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.09.13 "Technics of strong electric and magnetic fields". National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kiev, 2020.

In the thesis the actual scientific task of electrical equipment efficiency increase for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference has been solved by developing new mathematical models, development of the methods for electromagnetic field distribution control in the elements of corresponding test electrical equipment and conducting specialized experiments. The obtained results of the work are essential for the development of technics of strong electric and magnetic fields, as well as for the practice of high-voltage electrical equipment testing at the permissible level of electromagnetic interference.

In the first chapter of the thesis, the requirements of regulating international normative document CISPR 18-2 concerning testing methods and procedures of standards' setting for high-voltage insulators' electromagnetic interference, according to which testing procedures and limiting standardized values of external electromagnetic interference of both insulators and testing facilities are determined, are analyzed.

Existing test facilities' circuits for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference are described and implementation features of the main facilities' elements are characterized. The fact that elements of existing test facilities are bulky in design meant for operation at low frequencies is distinguished. When such circuits operate at high frequencies, capacitive and inductive current components of these elements are distorted, which leads to instability of high-voltage insulators' testing results at permissible level of electromagnetic interference. In addition, considerable size of these elements makes screening of test facilities' active parts from external electromagnetic interference impossible.

In order to develop small high-frequency high-voltage line traps, which are one of the main elements of high-voltage insulator testing facilities, the issue of using high-frequency line traps in power transmission lines has been considered and impossibility of their application in relevant facilities has been established.

The literature and scientific research analysis allowed us to identify a number of unresolved issues related to the actual problems of high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference.

The second chapter of the thesis presents the author's scientific developments concerning electric field control in the solenoid of high-frequency line trap by performing formation of its insulating core, which ensures matching of electric potential distribution in the coil with distribution of the potential induced by the coil magnetic field.

Mathematical model of high-frequency line trap compensating reactor is proposed. It allows us to take into account the parameters of each turn and conductors by means of modern computer technology application, which, unlike the existing developments, does not require a complex set of analytic functions. Practical model making will ensure pointed resonance adjustment of the line trap and sharp increase of its resistance.

Using the theory of multifactorial experiment planning and calculation of the induction coil electric field of high-frequency line trap, the form of the coil insulating core

was optimized by means of a personal computer. It ensures matching of this electric potential with the potential induced by the coil magnetic field up to 1 %.

The third chapter of the thesis contains information on the development, manufacture and implementation of a new test facility for high-voltage line cap and pin insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference by using the theoretical principles outlined in the thesis. Particular attention is paid to the normalized range of the level of electromagnetic interference measurements for high-voltage insulators at the created test facility, the parameters of which significantly exceed the requirements for the corresponding test facilities, specified by international standards CISPR 18-2, IEC 60437.

The results of electrical equipment calibration for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference, which set the level of external electromagnetic interference (the background of the installation) and the standard parameter values for the electrical equipment (for base frequencies of electromagnetic interference of 0.5 MHz and 1.0 MHz), are given.

On the basis of experimental studies on the electromagnetic interference level for high-voltage insulators the influence of insulator's embodiment nature (the depth of rodding and polymer coating) on the level of electromagnetic interference is determined and its insignificant importance for the further reduction of the electromagnetic interference level is pointed out. This confirms the assumptions formulated in this work about the necessity of further overcoming of electromagnetic interference occurrence in the insulators' insulation.

In the fourth chapter of the thesis, recommendations on the level of electromagnetic interference reduction from high-voltage insulators by considering the distribution of electric field created in the embodiment, as well as changes in this field due to the influence of various factors are presented.

Improvement of high-voltage line cap and pin insulators is offered by example of a typical insulator PS 120B, which means making of the insulator's rod with profiling of its conical part, providing the permanence of mechanical stresses in the cement-sand bed, and taking into account the ratio of the insulator rod sizes.

The threshold voltage values in the insulator which are connected with the appearance of internal discharges in the air micro-gaps of cement-sand bed is determined.

The use of proposed improved insulators' design 2.14 times reduces the maximum electric field strength in cement-sand beds of the rod, which ensures reduction of electromagnetic interference level in high-voltage line cap and pin insulators.

A comparison of experimentally obtained data on the electromagnetic interference level of control samples of typical high-voltage insulators with insulators of the improved design with profiling of the conical part in the insulator's rod has been made. It has been ascertained that the average level of electromagnetic interference in high-voltage insulators' experimental samples with the curvature radius of the rod conical part  $R = 3,5$  mm compared to the control samples of type PS 120B insulators is reduced by 16... 29 dB at test voltages of 10... 30 kV.

*Keywords: electric field, electric potential, electromagnetic interference level, high-frequency inductor, high-frequency line trap, high-voltage insulator, induced potential, simplex-method.*

Підписано до друку 16.06.20 р.   Формат 60х90<sup>1</sup>/16  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9  
Наклад 110 прим. Замовлення № 555  
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі “Принт-центр”  
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А  
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16  
<http://www.printc.com.ua>. E-mail [printcentr@ukr.net](mailto:printcentr@ukr.net)